МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 620.193.1:621.165.51 10.23947/1992-5980-2018-18-1-6-15

Оценка эрозионной стойкости упрочненных металлических сплавов в условиях каплеударного воздействия[*]

О. В. Кудряков[1], В. Н. Варавка[2], И. Ю. Забияка[3], Н. И. Бронникова[4]**
[1,2,3,4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Estimation of erosion resistance of hardened metal alloys under conditions of droplet impact [***]

O. V. Kudryakov[1], V. N. Varavka[2], I. Yu. Zabiyaka[3], N. I Bronnikova[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена изучению явления каплеударной эрозии, которая развивается в металлических материалах при частотах капельных соударений 50…200 с$^{-1}$ и скоростях 150…600 м/с. Исследована возможность сравнительной оценки сопротивления износу материалов различных структурных классов с различным уровнем механических свойств. Основной целью работы было создание расчетно-аналитической модели эрозионного износа упрочненных материалов. Параллельно решалась задача критериальной оценки материалов, с помощью которой можно было бы отнести их к пластичным или упрочненным, после чего использовать соответствующую модель механики усталостного разрушения.
Материалы и методы. Для расчетно-аналитических оценок эрозионной стойкости материалов использованы известные зависимости механики разрушения и теории усталости Пэриса-Эрдогана. Параметры расчетных выражений получены на базе результатов стендовых эрозионных испытаний и данных растровой электронной микроскопии образцов стали 20Х13 с мартенситной структурой.
Результаты исследования. В качестве классификационного критерия пластичных и прочных материалов предложено использовать их диаграммы предельных состояний. В частности, на основе такой диаграммы упрочненных материалов могут быть определены значения начального и критического размера хрупкой трещины, которые используются в основной модели для расчета эрозионной стойкости материала.
На базе уравнения Пэриса усталостной теории Пэриса-Эрдогана разработана и научно обоснована расчетно-аналитическая модель для оценки эрозионной стойкости упрочненных материалов, деградация поверхности которых происходит по механизму зарождения и развития трещин скольного типа. Представлены данные расчетов для образцов мартенситной стали 20Х13 с использованием экспериментально полученных параметров уравнения Пэриса.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты акту-

Introduction. The phenomenon of the droplet impingement erosion which develops in the metallic materials at the frequencies of drop collisions of 50 ... 200 s^{-1} and velocities of 150 ... 600 m/s is considered. The comparative estimability of the wear resistance of materials of various structural classes and with different levels of mechanical properties is investigated. The major goal of the work is the development of a computational and analytical model of erosion wear of hardened materials. In parallel, the problem of the criterial evaluation of materials, with the help of which they could be attributed to plastic or reinforced materials and then used as a corresponding model of the fatigue failure mechanics, is solved.
Materials and Methods. The well-known dependences of the fracture mechanics and the fatigue theory of Paris-Erdogan are used for the computational and analytical estimates of the erosion resistance of materials. The calculated expressions parameters are obtained on the basis of the bench erosion test results and scanning electron microscopy data of samples of 20Cr13 steel with a martensitic structure.
Research Results. It is suggested to use limiting state diagrams of the ductile and durable materials as their classification criterion. In particular, the initial and critical size of the brittle fracture can be determined on the basis of such a diagram of the hardened materials. These values are used in the basic model to calculate the erosion resistance of the material. Based on the Paris equation from the fatigue theory of Paris-Erdogan, a computational and analytical model for estimating the erosion resistance of the hardened materials is developed and scientifically proven. Their surface degradation occurs according to the mechanism of nucleation and development of cracks of the clasped type. The calculation data are presented for samples of martensitic 20Cr13 steel using the experimentally obtained parameters of the Paris equation.
Discussion and Conclusions. The results obtained are relevant

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18–08–00546).
[**] E-mail: kudryakov@mail.ru, varavkavn@gmail.com, zabiyakaigor@gmail.com, makarovani88@mail.ru
[***] The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 18–08–00546).

альны для выбора, оптимизации или разработки эрозионно-стойких материалов для высокоскоростных лопастей парогазотурбинного и компрессорного оборудования, работающих в условиях образования капельного конденсата.

for the selection, optimization or development of the erosion-resistant materials for high-speed blades of the steam-gas turbine and compressor equipment operating under the conditions of condensate formation.

Ключевые слова: каплеударная эрозия, усталостное разрушение, мартенситная сталь.

Keywords: droplet impingement erosion, fatigue fracture, martensitic steel.

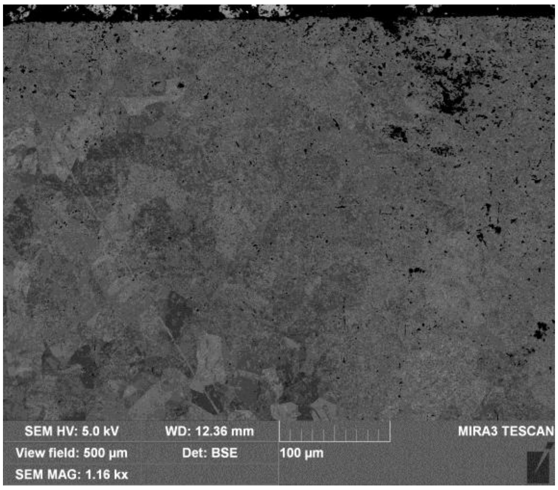
***Образец для цитирования*:** Оценка эрозионной стойкости упрочненных металлических сплавов в условиях каплеударного воздействия / О. В. Кудряков [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С.6−15.

For citation: O.V. Kudryakov, V.N. Varavka, I.Yu. Zabiyaka, N.I Bronnikova. Estimation of erosion resistance of hardened metal alloys under conditions of droplet impact. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 6−15.

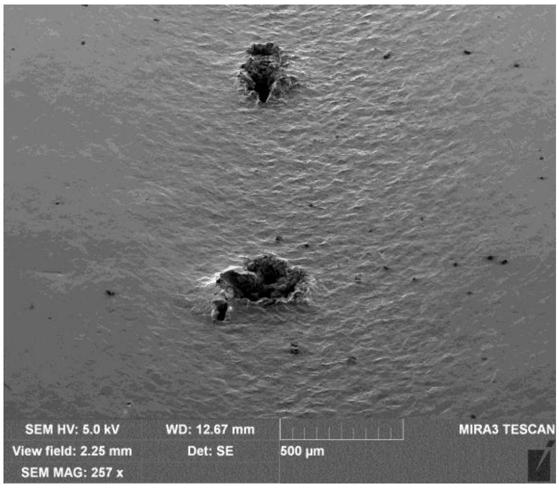
Введение. Единичный удар водяной капли по металлической поверхности выглядит довольно безобидным и не может причинить ей большого вреда. Однако при длительном циклическом воздействии капель с частотой соударений 50…200 $с^{-1}$ и скоростью 150…600 м/с происходит стремительное эрозионное разрушение металла. На практике условия каплеударной эрозии формируются при наличии конденсата в парогазовых средах, что приводит к прогрессирующему износу лопастей парогазотурбинного и компрессорного оборудования. Несмотря на актуальность проблемы и её активное изучение [1–5], к настоящему времени физическая природа инициации износа при ударно-капельном воздействии до конца не ясна. Сложность анализа обусловлена тем, что каплеударное воздействие включает несколько составляющих: механическую (усталостную), кавитационную (гидродинамическую и пузырьковую) и коррозионную [6–10].

Кинетика эрозионного износа включает несколько стадий [11, 12]. Первая из них, инкубационная, характерна тем, что признаков разрушения и потери массы металла на этой стадии ещё нет. Поэтому длительность инкубационного периода обычно принимается в качестве антиэрозионного свойства материала в условиях каплеударного воздействия.

В ряде работ [8, 13–17] авторами исследованы особенности этого явления в таких *пластичных* металлических материалах, как однофазные титановые сплавы, сталь с аустенитной или сорбитной структурой. Начало изнашивания в этом случае определяется развитием подповерхностной усталостной пористости (рис. 1, a), возникающей в металле в зоне соударения по механизму перколяции [18, 19] с последующим слиянием пор и формированием первичных поверхностных эрозионных кратеров износа (рис. 1, b). В этом случае кратеры имеют характерную морфологию с весьма разветвленной поверхностью.



a)

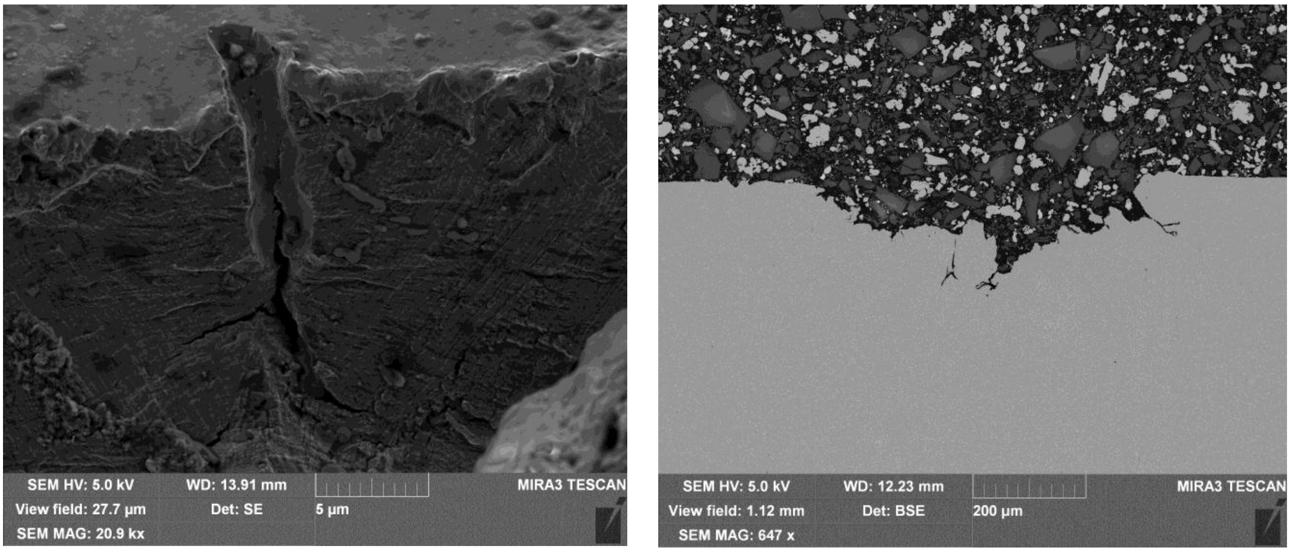


b)

Рис. 1. Зарождение износа при каплеударной эрозии образцов аустенитной стали 08Х18Н10Т (РЭМ): а — формирование усталостной пористости в месте соударения (сечение образца по глубине); b — образование первых эрозионных кратеров (эрозионная дорожка на поверхности образца)

Fig. 1. Origin of wear under drip erosion of samples of austenic steel 08Cr18Ni10Ti (SEM): a – formation of fatigue porosity at collision site (cross section of the sample in depth); b – formation of the first erosion craters (erosion track on the sample surface)

Морфологические особенности такого износа и его расчетно-аналитическая модель, разработанная на принципах усталостной теории Гудмена, наиболее полно представлены в работе [8]. В *упрочненных* же металлических материалах механизм перколяции не может быть реализован, так как размер зон пластичности слишком мал. В этом случае усталостная пористость не образуется, а морфология первичных кратеров износа определяется механизмом зарождения, роста и ветвления хрупких (скольного типа) усталостных трещин. Отличительными признаками такого механизма зарождения эрозионных кратеров являются сравнительно гладкая (фасеточная) поверхность их стенок (рис. 2, a) и наличие трещин в поперечном сечении кратеров (рис. 2, b).



a) *b)*

Рис. 2. Эрозионные кратеры на поверхности образца мартенситной стали 20Х13 (РЭМ)):
a — стенка первичного кратера с ветвящейся острой трещиной;
b — поперечное сечение кратера с усталостными трещинами

Fig. 2. Erosion craters on the surface of sample of martensitic steel 20Cr13 (SEM)):
a – wall of primary crater with sharp branching crack;
b – cross section of crater with fatigue cracks

Исходя из анализа вышеупомянутых экспериментальных данных была сформулирована цель настоящей работы — нахождение закономерностей и создание расчетно-аналитической модели эрозионного износа рассматриваемых материалов. Параллельно решалась задача критериальной оценки материалов, с помощью которой можно было бы отнести их к *пластичным* или *прочным* и использовать соответствующую модель механики усталостного разрушения.

Использование диаграмм предельных состояний материала в расчетной модели. Анализ базы экспериментальных данных, полученных в результате стендовых эрозионных испытаний образцов сталей с различной структурой, позволяет рекомендовать их *диаграммы предельных состояний* в качестве классификационного критерия пластичных и прочных материалов. В механике разрушения диаграмма предельных состояний определяет зоны хрупкого и вязкого разрушения материала. Общий вид такой диаграммы представлен на рис. 3, где продемонстрировано предельное состояние по временному сопротивлению σ_B в соответствии с теорией пластичности (наклонная прямая 1) и предельные состояния в соответствии с линейной механикой разрушения (кривые 2 и 3). Диаграмма на рис. 3 нуждается в некоторых комментариях, поскольку, применительно к исследуемой нами проблеме, отличается от своих классических предшественников.

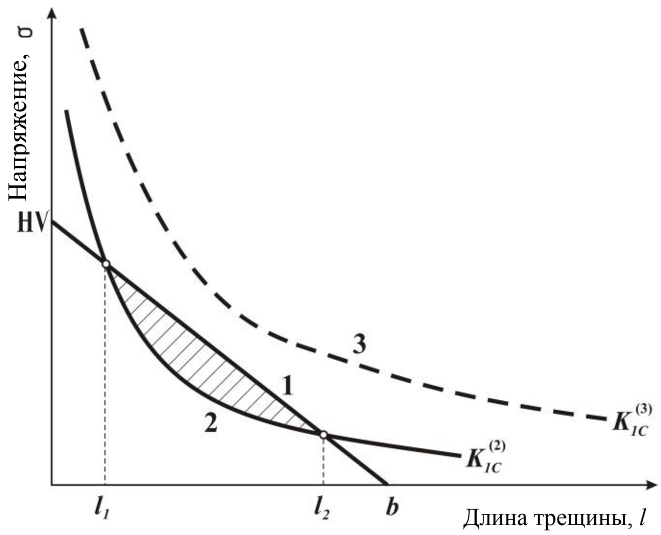


Рис. 3. Общий вид диаграммы предельных состояний с линиями предельных (1) и критических (2, 3) напряжений

Fig. 3. General form of limiting states diagram with lines of limiting (1) and critical (2, 3) stresses

В фундаментальной работе [20, С. 23] доказано, что для различных видов нагружения как при пластическом, так и при хрупком разрушении трещиностойкость K_{IC} определяется временным сопротивлением (пределом прочности) материала σ_B и конструктивным размером образца b (например, толщиной или шириной пластины):

$$K_{1C} \cong 0,5 \cdot \sigma_B \cdot \sqrt{b}, \quad \text{откуда} \quad b \cong \frac{4 \cdot K_{1C}^2}{\sigma_B^2}, \tag{1}$$

где K_{IC} — критический коэффициент концентрации напряжений для трещины скольного типа (хрупкая трещина типа I).

Выражение (1) универсально, поскольку выведено для наиболее общих и простых случаев — неограниченного полупространства по глубине материала и неограниченной плоскости поверхности образца. Оно справедливо как для случая поверхностной трещины, распространяющейся в глубину, когда ограничивающим размером является толщина образца, так и для центральной (внутренней) трещины, растущей вдоль своей оси, когда ограничивающим размером b является ширина образца.

С учетом выражения (1) линия предельного состояния 1 на рис. 3 определяется как:

$$\sigma_p(l) = HV \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_B}{2 \cdot K_{1C}}\right)^2 \cdot l\right] \tag{2}$$

В выражении (2) учтено, что рассматриваемые процессы каплеударного воздействия локализованы на поверхности материала. Все возникающие при этом трещины являются поверхностными (т. е. направлены в глубину образца либо от его поверхности, как на рис. 2, a, либо от поверхности кратера, как на рис. 2, b). Когда трещина достигает некоторого определенного макроразмера (например, l_2 или b), все процессы, определяющие её продвижение, локализованы в вершине трещины. В этом случае эти процессы происходят на некоторой глубине от поверхности и использование в расчетах такой *макроскопической* (т. е. объемной) характеристики, как σ_B в выражениях (1) и (2), с физической точки зрения оправдано. Когда же рассматривается процесс поверхностного зарождения трещины (например, l_1), необходимо учитывать поверхностные эффекты (например, поверхностное натяжение или силы отображения, действующие на дислокации), которые требуют дополнительной работы зарождения по сравнению с работой зарождения трещины в объеме материала. В этом случае предельное состояние материала должно характеризоваться более высоким уровнем напряжения, чем σ_B. Такой более высокий уровень напряжений на диаграмме предельных состояний *для поверхностной трещины* задан в

выражении (2) и на рис. 3 для линии 1 при l=0 значением твердости HV, что соответствует физическому смыслу твердости как поверхностного свойства.

Линии критических напряжений (кривые 2 и 3 на рис. 3) представляют собой степенные функции:

$$\sigma_k(l) = \frac{K_{1C}}{Y \cdot \sqrt{\pi \cdot l}} \qquad (3)$$

Высоким значениям K_{1C} соответствует кривая 3, причем хрупкое состояние в этом случае не достигается, так как линии предельных состояний 1 и 3 не пересекаются. На диаграмме предельных состояний аустенитной стали 08Х18Н10Т линии не пересекаются, что говорит об отсутствии трещин и позволяет отнести её к пластичным материалам с перколяционным механизмам усталостного разрушения в условиях каплеударного износа.

Область трещин l_1–l_2 соответствует хрупкому состоянию при K_{1C}, отвечающему кривой 2. Из рис. 3 видно, что при уменьшении K_{1C}, а также с возрастанием значений HV или b (при фиксированном K_{1C}) заштрихованная область хрупкого состояния l_1–l_2 увеличивается. Точки пересечения графиков на рис. 3 по своей физической сущности представляют собой начальный $l_l \equiv l_0$ и критический $l_2 \equiv l_C$ размеры трещины. При $l<l_0$ трещина самопроизвольно не растет, и опасности хрупкого разрушения нет. При $l \geq l_C$ рост трещины необратимо и автокаталитически ускоряется, разрушение (образование кратера эрозионного износа) происходит катастрофически быстро. Такая картина наблюдается, например, на диаграмме предельных состояний стали 20Х13 со структурой мартенсита. Значения l_0 и l_C в рамках предлагаемой расчетно-аналитической модели находятся путем совместного решения уравнений (2) и (3) для предельных σ_p и критических σ_k напряжений для материала, заданного такими свойствами, как твердость HV, предел прочности σ_B, трещиностойкость K_{1C}, а также с учетом геометрических параметров трещины Y. Множитель Y характеризует тип трещины и может быть определен из справочников [21]. При этом в зависимости от выбора типа трещины, значения Y могут существенно отличаться и их необходимо согласовывать с экспериментом. Так, например, экспериментальные данные по каплеударной эрозии образцов стали 20Х13 с мартенситной структурой дают: l_C=68 мкм — для проекции трещины на поверхности образца и l_C=7 мкм — для проекции трещины по сечению образца (по глубине).

Расчетно-аналитическая модель для оценки эрозионной стойкости упрочненных металлических сплавов. В интервале между l_0 и l_C скорость роста трещины (в расчете на один цикл нагружения, т. е. на один удар капли) может быть определена на основе теории усталости Пэриса-Эрдогана [22] с помощью уравнения Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = A\Delta K^m \qquad (4)$$

В свою очередь величина ΔK определяется выражением:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi l} \qquad (5)$$

с учетом следующих условий:

$$K_{\max} = \sigma_{\max}\sqrt{\pi l} \text{ и } K_{\min} = \sigma_{\min}\sqrt{\pi l} \text{ для } \sigma_{\min} > 0 \text{ и } K_{\min} = 0 \text{ для } \sigma_{\min} \leq 0$$

Здесь K — коэффициент концентрации напряжений для соответствующих максимального σ_{max} и минимального σ_{min} напряжений единичного цикла.

Для использования методического аппарата теории Пэриса-Эрдогана необходимо экспериментальное определение параметров уравнения Пэриса m и A, которые являются эмпирическими константами материала. Так, например, выполненные авторами стендовые испытания образцов стали 20Х13 с мартенситной структурой для условий каплеударной эрозии дают значения параметров уравнения Пэриса: m = 2,5 и A = $3{,}403 \cdot 10^{-9}$ м/цикл.

В работе [8] доказано, что при соударении жидкой капли с металлической поверхностью напряжение σ распределяется по поверхности во времени τ в соответствии графиком на рис. 4. Величина σ выражена в относительных единицах $\rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0$, называемых приближением гидравлического удара. Время τ также имеет относительную шкалу, где ρ_0 — плотность жидкости, c_0 — скорость звука в жидкости при нормальных условиях, V_0 — скорость соударения, R_0 — радиус капли.

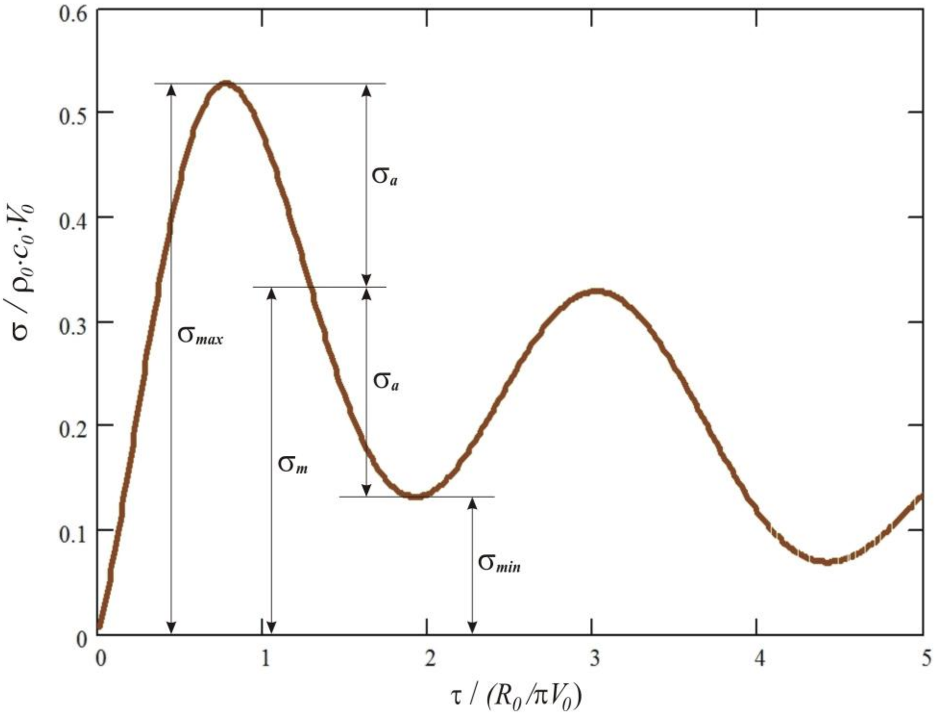


Рис. 4. Расчетные параметры цикла нагружения при капельном соударении

Fig. 4. Calculated parameters of loading cycle in case of drop collision

На рис. 4 отмечены величины напряжений, принятые в теории усталости, в частности в теории Пэриса-Эрдогана (максимальное σ_{max}, минимальное σ_{min}, среднее σ_m и т. д.). Однако они требуют уточнения для использования в уравнении Пэриса (4). На рис. 4 представлено распределение напряжений для однократного соударения, а уравнение Пэриса используется для многоциклового нагружения. При однократном соударении с увеличением времени $\sigma_{min} \to 0$, поэтому единичный цикл нагружения становится отнулевым. При этом время между соударениями, попадающими в одну точку, превышает время единичного соударения в несколько раз. При отнулевом цикле нагружения в формуле (5) в соответствии с рис. 4 следует принимать:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} = 0{,}528 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0. \tag{6}$$

Решением уравнения Пэриса (4) для условий каплеударной эрозии может быть найдено допустимое количество циклов (капельных соударений) N_C, определяющее продолжительность инкубационного периода эрозионного износа данного материала:

$$N_C = \int_0^{N_C} dN = \int_{l_0}^{l_C} \frac{da}{A \cdot (\Delta K)^m} \tag{7}$$

Строго говоря, полученное интегрированием значение N_C не является величиной инкубационного периода каплеударной эрозии m_0, поскольку не учитывает количество циклов N_3, необходимых для образования трещины размером l_0. Поэтому для прикладного использования выражения (7) необходимы корреляции величины N_C с данными стендовых испытаний с учетом того, что $m_0 = N_3 + N_C$.

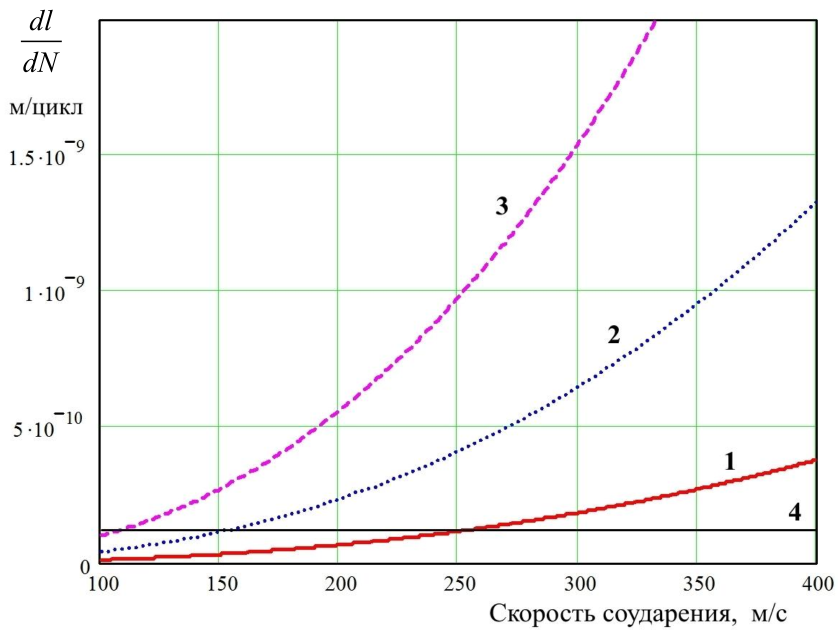


Рис. 5. Зависимость скорости роста трещины в стали 20Х13 с мартенситной структурой от скорости капельного соударения при различных значениях начальной длины трещины: 1 — 0,55 мкм; 2 — 1,5 мкм; 3 — 3,0 мкм; 4 — пороговое значение роста острой трещины

Fig. 5. Dependence of crack growth rate in 20Cr13 steel with martensitic structure on drip collision rate for different values of initial crack length: 1 – 0.55 µm; 2 – 1.5 µm; 3 – 3.0 µm; 4 – threshold value of sharp crack growth

Не вдаваясь в детали данной корреляции, которые выполнены при разработке расчетно-аналитической модели, приведем результат использования теории Пэриса-Эрдогана (4)+(5)+(7) с учетом особенностей каплеударного механизма эрозии (6) на примере стали 20Х13 с мартенситной структурой, представленный на рис. 5. Зависимости на рис. 5 можно рассматривать в качестве *прикладного критерия эрозионного разрушения*, показывающего минимальное значение скорости соударения, при котором инициируется износ в стали. Если график функции на рис. 5 находится ниже линии порогового значения, то расстояние, на которое трещина продвигается за один цикл нагружения, лежит в области упругих деформаций и упруго релаксирует после снятия нагрузки. В этом случае трещина расти не будет. Так, например, из рис. 5 следует, что, если в мартенсите стали 20Х13 уже есть трещины длиной l_0=1,5 мкм (линия 2), то они будут развиваться при скоростях соударения V_0, превышающих 150 м/с.

Обсуждения и заключение. Представленная расчетно-аналитическая модель формирования износа при каплеударной эрозии упрочненных материалов включает две фактически независимых части. В первой из них путем построения диаграммы предельных состояний материала определяются начальный l_0 и критический l_C размеры трещин, которые зависят исключительно от структуры и механических свойств материала (HV, σ_B, K_{1C}). Во второй части на основе уравнения Пэриса из усталостной теории Пэриса-Эрдогана рассчитывается предельное количество циклов нагружения (число ударов капель, попадающих в одну точку), которое материал может выдержать до начала формирования износа, соответствующего значению l_C. При этом параметры уравнения Пэриса для исследуемого материала должны быть определены из эксперимента. Для приблизительной сравнительной оценки допустимо использовать известные типичные значения параметров, которые приводятся в научной литературе, однако, далеко не все типы материалов изучены с точки зрения использования для них уравнения Пэриса. Поэтому сравнение материалов и использование для них типичных значений (не только параметров уравнения Пэриса) следует проводить с обязательным учетом структурных особенностей.

Предложенный в работе расчетный критерий в виде минимальной скорости соударений , при которой инициируется эрозионный каплеударный износ, можно рассматривать как универсальный для любого материала. Аналогичный критерий был апробирован авторами в работе [8] на основе усталостной модели Гудмена для *пластичных* материалов, в настоящей же работе он использован для *упрочненных* материалов и рассчитан на базе модели Пэриса-Эрдогана. Это обеспечивает единое измерительное пространство для материалов, деградация поверхности которых при каплеударной эрозии происходит по принципиально различным механизмам — путем развития хрупких трещин в упрочненных материалах (например, в мартенситной стали 20Х13, рассмотренной в настоящей работе) и путем образования

усталостной пористости по механизму перколяции в пластичных $V_0^{\min}$ материалах (например, в аустенитной стали 08Х18Н10Т, рассмотренной в работе [8]).

Библиографический список

1. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate // Wear. – 2010. – Vol.269. – pp. 310–316.

2. Рыженков, В. А. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин / В. А. Рыженков, А. И. Лебедева, Ал. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2011. — № 9. — С. 9–13.

3. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities // Wear. — 2011. — Vol. 271. — pp. 2625–2631.

4. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. — 2012. — Vol. 1, no. 3. — pp. 214–226.

5. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V // Wear of Materials. — 2013. — Vol.301, iss.1–2. — pp. 442–448.

6. Чижов, А. В. Высокоскоростной удар капли о преграду / А. В. Чижов, А. А. Шмидт // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 12. — С. 18–26.

7. Haller K.K., Ventikos Y., Poulikakos D., Monkewitz P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 92, №5. P.2821-2828.

8. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 1 : Начальная стадия каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 1. — С. 89–99.

9. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 2 : Стадия развитой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 2. — С. 201–212.

10. Кудряков, О. В. К проблеме водородного охрупчивания стали при каплеударной эрозии / О. В. Кудряков [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 2 (89). — С. 56–69.

11. Варавка, В. Н. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов / В. Н. Варавка [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2011. — № 6. — С. 92–98.

12. Кинетика зарождения и развития процесса эрозионного разрушения поверхности сталей при каплеударном воздействии / В. А. Рыженков [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. — 2012. — №1 (16). — С. 67–71.

13. Варавка, В. Н. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 8 (59), вып. 2. — С. 1376–1384.

14. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Ч. 1 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 5. — С. 36–43.

15. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Ч. 2 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 6. — С. 14–19.

16. Варавка, В. Н. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2012. — № 3. — С. 45–50.

17. Кудряков, О. В. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2012. — № 10. — С. 40–47.

18. Штремель, М. А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация / М. А. Штремель. — Москва : МИСиС, 1997. — 527 с.

19. Эшби, М. Конструкционные материалы. Полный курс / М. Эшби, Д. Джонс. — Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2010. — 672 с.

20. Механика разрушения и прочность материалов / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наукова Думка, 1988. — 436 с.

21. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Ю. Ито, Ю. Мураками [и др.]. — Москва : Мир, 1990. — 448 с.

22. Paris P. A critical analysis of crack propagation laws [Text] / P. Paris and F. Erdogan // Trans. ASME, J. Basic Engng. – 1963. – Vol. 15. – P. 528 – 534.

References

1. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate. Wear, 2010, vol. 269, pp. 310–316.

2. Ryzhenkov, V.A., Lebedev, A.I., Mednikov, Al.F. Sovremennoe sostoyanie i sposoby resheniya problemy erozionnogo iznosa lopatok vlazhno-parovykh stupeney turbin. [Erosion wear of the blades of wet-steam turbine stages: Present state of the problem and methods for solving it.] Thermal Engineering, 2011, no. 9, pp. 9–13 (in Russian).

3. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities. Wear, 2011, vol. 271, 2625–2631.

4. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material. Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2012, vol. 1, no. 3, pp. 214–226.

5. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V. Wear of Materials, 2013, vol.301, iss.1–2, pp. 442–448.

6. Chizhov, A.V., Shmidt, A.A. Vysokoskorostnoy udar kapli o pregradu. [Impact of a high-velocity drop on an obstacle.] Technical Physics, 2000, vol. 70, iss. 12, pp. 18–26 (in Russian).

7. Haller, K.K., Ventikos, Y., Poulikakos, D., Monkewitz, P. Computational study of High-speed liquid droplet impact. Journal of Applied Physics, 2002, vol. 92, no. 5, pp. 2821-2828.

8. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 1: Nachal'naya stadiya kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear under the impact of discrete water-droplet stream, Part I: Initial stage of droplet-impingement erosion.] Journal of Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 89–99 (in Russian).

9. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 2: Stadiya razvitoy kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear under the impact of discrete water-droplet stream. Part II: Stage of the developed droplet-impingement erosion.] Journal of Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 201–212 (in Russian).

10. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N., Irkha, V.A., Moiseeva, I.V. K probleme vodorodnogo okhrupchivaniya stali pri kapleudarnoy erozii. [To problem of hydrogen embrittlement of steel at droplet impingement erosion.] Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no. 2 (89), pp. 56–69 (in Russian).

11. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V., Mednikov, Al.F., Irkha, V.A. Zakonomernosti i parametry kapleudarnoy erozii titanovykh splavov. [Laws and parameters of droplet-shock erosion of titanic alloys.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2011, no. 6, pp. 92–98 (in Russian).

12. Ryzhenkov, V.A., Kachalin, G.V., Mednikov, A.F., Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Kinetika zarozhdeniya i razvitiya protsessa erozionnogo razrusheniya poverkhnosti staley pri kapleudarnom vozdeystvii. [Kinetics of nucleation and development of the erosive destruction of steel surface when affected by droplet impingement.] Safety and Reliability of Power Industry, 2012, no. 1 (16), pp. 67–71 (in Russian).

13. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Prochnost' i mekhanizmy razrusheniya vysokoplastichnykh materialov pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. [Strength and high-plasticity materials fracture mechanisms under discrete water-droplet flow.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 8 (59), iss. 2, pp. 1376–1384 (in Russian).

14. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Ch. 1. [Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-speed drip collisions: Part 1.] Materialovedenie, 2012, no. 5, pp. 36–43 (in Russian).

15. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Ch. 2. [Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-speed drip collisions: Part 2.] Materialovedenie, 2012, no. 6, pp. 14–19 (in Russian).

16. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Osobennosti razrusheniya metallicheskikh splavov v usloviyakh ustoychivoy kapleudarnoy erozii. [Features of destraction of metal alloys in the conditions of steady droplet-shack erosion.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2012, no. 3, pp. 45–50 (in Russian).

17. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Monitoring nachal'nykh stadiy erozionnogo iznosa ionno-plazmennykh pokrytiy pri kapleudarnom vozdeystvii. [Monitoring of initial stages of erosive wear of ion-plasma coatings at droplet-shock impacts.] Strengthening Technologies and Coatings, 2012, no. 10, pp. 40–47 (in Russian).

18. Shtremel, M.A. Prochnost' splavov. Ch.2. Deformatsiya. [Strength of alloys. Part 2. Deformation.] Moscow: MISiS, 1997, 527 p. (in Russian).
19. Ashby, M., Jones, D. Konstruktsionnye materialy. Polnyy kurs. [Engineering materials. Full course.] Dolgoprudny: Publ. House "Intellect", 2010, 672 p. (in Russian).
20. Panasyuk, V.V., ed. Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov. [Fracture mechanics and strength of materials.] Kiev: Naukova Dumka, 1988, 436 p. (in Russian).
21. Ito, Y., Murakami, Y. et al. Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazheniy. [Stress Intensity Factors Handbook.] Moscow: Mir, 1990, 448 p. (in Russian).
22. Paris, P. and F. Erdogan, A. critical analysis of crack propagation laws [Text]. Trans. ASME, J. Basic Engng., 1963, vol. 15, pp. 528 – 534.

Поступила в редакцию 08.12.2017
Сдана в редакцию 12.12.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 08.12.2017
Submitted 12.12.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Кудряков Олег Вячеславович,
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, главный научный сотрудник НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389
kudryakov@mail.ru

Варавка Валерий Николаевич,
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, руководитель НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4703-7372,
varavkavn@gmail.com

Забияка Игорь Юрьевич,
аспирант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, мл. научн. сотрудник НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6759-549X,
zabiyakaigor@gmail.com

Бронникова Наталья Ивановна,
аспирантка кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1319-7263,
makarovani88@mail.ru

Authors:

Kudryakov, Oleg V.,
professor of the Physical and Applied Material Science Department, Don State Technical University, Chief Researcher of the SEC "Materials", DSTU (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square,1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389
kudryakov@mail.ru

Varavka, Valery N.,
professor of the Physical and Applied Material Science Department, Don State Technical University, Head of the SEC "Materials", DSTU (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square,1), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4703-7372,
varavkavn@gmail.com

Zabiyaka, Igor Yu.,
postgraduate student of the Physical and Applied Material Science Department, Don State Technical University, Junior Researcher of the SEC "Materials", DSTU (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6759-549X,
zabiyakaigor@gmail.com

Bronnikova, Natalia I.,
postgraduate student of the Physical and Applied Material Science Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1319-7263,
makarovani88@mail.ru